

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

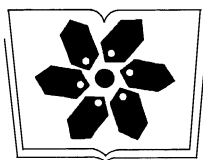
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第8期 Vol.32 No.8 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 8 期

2012 年 4 月 (半月刊)

目 次

| | |
|---|-------------------------|
| 东北地区 5 种阔叶树苗木对火烧的生理响应..... | 王 荣, 胡海清 (2303) |
| 梭梭木虱发生规律及其影响因子..... | 李粉莲, 吴雪海, 王佩玲, 等 (2311) |
| 基于遥感降尺度估算中国森林生物量的空间分布..... | 刘双娜, 周 涛, 舒 阳, 等 (2320) |
| 流域景观格局与河流水质的多变量相关分析..... | 赵 鹏, 夏北成, 秦建桥, 等 (2331) |
| 内蒙古达赉湖地区赤狐生境选择及生境景观特征分析..... | 张洪海, 李成涛, 窦华山, 等 (2342) |
| 雅鲁藏布江流域底栖动物多样性及生态评价..... | 徐梦珍, 王兆印, 潘保柱, 等 (2351) |
| 用组合模型综合比较的方法分析气候变化对朱鹮潜在生境的影响..... | 翟天庆, 李欣海 (2361) |
| 2010 年牧区 2 代草地螟成虫迁飞的虫源分析 | 张 丽, 张云慧, 曾 娟, 等 (2371) |
| 基于细胞色素 b 基因的中国岩羊不同地理种群遗传差异分析..... | 李楠楠, 刘振生, 王正寰, 等 (2381) |
| 喀斯特峰丛洼地不同退耕还林还草模式的土壤微生物特性..... | 鹿士杨, 彭晚霞, 宋同清, 等 (2390) |
| 永定河沿河沙地杨树人工林生态系统呼吸特征..... | 方显瑞, 张志强, 查同刚, 等 (2400) |
| 基于湿地植物光谱的水体总氮估测..... | 刘 克, 赵文吉, 郭逍宇, 等 (2410) |
| 背瘤丽蚌 F 型线粒体基因组全序列分析 | 陈 玲, 汪桂玲, 李家乐 (2420) |
| 流域“源-汇”景观格局变化及其对磷污染负荷的影响——以天津于桥水库流域为例 | 李崇巍, 胡 婕, 王 飒, 等 (2430) |
| 线虫群落对抚顺煤矸石山周边土壤可溶性盐污染的响应..... | 张伟东, 吕 莹, 肖 莹, 等 (2439) |
| 地上竞争对林下红松生物量分配的影响..... | 汪金松, 范秀华, 范 娟, 等 (2447) |
| 湿地松和马尾松人工林土壤甲烷代谢微生物群落的结构特征..... | 王 芸, 郑 华, 陈法霖, 等 (2458) |
| 马尾松和杉木树干韧皮部水溶性糖 $\delta^{13}\text{C}$ 值对气象因子的响应 | 卢钰茜, 王振兴, 郑怀舟, 等 (2466) |
| 沙坡头人工植被演替过程的土壤呼吸特征..... | 高艳红, 刘立超, 贾荣亮, 等 (2474) |
| 豫西刺槐能源林的热值动态..... | 谭晓红, 刘诗琦, 马履一, 等 (2483) |
| 铁皮石斛种子的室内共生萌发 | 吴慧凤, 宋希强, 刘红霞 (2491) |
| 红光与远红光比值对温室切花菊形态指标、叶面积及干物质分配的影响 | 杨再强, 张继波, 李永秀, 等 (2498) |
| 扑草净对远志幼苗根系活力及氧化胁迫的影响..... | 温银元, 郭平毅, 尹美强, 等 (2506) |
| 地表臭氧浓度增加和 UV-B 辐射增强及其复合处理对大豆光合特性的影响 | 郑有飞, 徐卫民, 吴荣军, 等 (2515) |
| AMF 对喀斯特土壤枯落物分解和对宿主植物的养分传递 | 何跃军, 钟章成, 董 鸣 (2525) |
| 传统豆酱发酵过程中细菌多样性动态..... | 葛菁萍, 柴洋洋, 陈 丽, 等 (2532) |
| 定位施肥对紫色菜园土磷素状况的影响..... | 孙倩倩, 王正银, 赵 欢, 等 (2539) |
| 基于生态需水保障的农业生态补偿标准..... | 庞爱萍, 孙 涛 (2550) |
| 保障粮食安全造成的生态价值损失评估模型及应用..... | 芦蔚叶, 姜志德, 张应龙, 等 (2561) |
| 专论与综述 | |
| 疏浚泥用于滨海湿地生态工程现状及在我国应用潜力..... | 黄华梅, 高 杨, 王银霞, 等 (2571) |
| 问题讨论 | |
| 厌氧氨氧化菌群体感应系统研究..... | 丁 爽, 郑 平, 张 萌, 等 (2581) |
| 基于形态结构特征的洞庭湖湖泊健康评价..... | 帅 红, 李景保, 夏北成, 等 (2588) |
| 研究简报 | |
| 黄土高原不同树种枯落叶混合分解效应..... | 刘增文, 杜良贞, 张晓曦, 等 (2596) |
| 不同经营类型毛竹林土壤活性有机碳的差异..... | 马少杰, 李正才, 王 斌, 等 (2603) |
| 干旱对辣椒光合作用及相关生理特性的影响 | 欧立军, 陈 波, 邹学校 (2612) |
| 硅和干旱胁迫对水稻叶片光合特性和矿质养分吸收的影响 | 陈 伟, 蔡昆争, 陈基宁 (2620) |



封面图说: 红树林粗大的气生根——红树林是热带、亚热带海湾及河口泥滩上特有的常绿灌木或乔木群落。由于海水环境条件特殊, 红树林植物具有一系列特殊的生态和生理特征。其中之一就是气根, 红树从根部长出许多指状的气生根露出海滩地面, 以便在退潮时甚至潮水淹没时用以通气, 故称呼吸根。在中国, 红树林主要分布在海南、广西、广东和福建省沿海, 它一般分布于高潮线与低潮线之间的潮间带, 往往潮差越大, 红树的呼吸根就长得越高越粗大。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chen@163.com

DOI: 10.5846/stxb201103080283

刘克, 赵文吉, 郭道宇, 王翊虹, 孙永华, 苗茜, 王京萌. 基于湿地植物光谱的水体总氮估测. 生态学报, 2012, 32(8): 2410-2419.

Liu K, Zhao W J, Guo X Y, Wang Y H, Sun Y H, Miao Q, Wang J M. Estimating total nitrogen content in water body based on reflectance from wetland vegetation. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(8): 2410-2419.

基于湿地植物光谱的水体总氮估测

刘 克^{1,2,3,4}, 赵文吉^{1,2,3,4}, 郭道宇^{1,2,3,4,*}, 王翊虹⁵, 孙永华^{1,2,3,4},
苗 茜^{1,2,3,4}, 王京萌^{1,2,3,4}

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048;

2. 北京市城市环境过程与数字模拟重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地, 北京 100048;

3. 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048; 4. 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室, 北京 100048;

5. 北京市地质研究所, 北京 100120)

摘要: 利用再生水补充城市湿地是目前湿地恢复与重建的主要方向, 然而再水中高浓度的氮、磷含量极易导致水体富营养化。遥感技术已成为富营养化监测的重要手段, 但对于植被覆盖水域的富营养化直接探测存在一定的局限性。以北京市典型再生水补水湿地奥林匹克公园南园湿地为研究区, 利用湿地植物光谱进行水体富营养化主控因子总氮的遥感探测。测定芦苇 (*Phragmites australis*) 和香蒲 (*Typha angustifolia*) 的叶片光谱及水体总氮含量, 在对数据进行预处理的基础上建立二者的关系模型, 包括单变量模型 (比值光谱指数 (SR) 模型和归一化差值光谱指数 (ND) 模型), 与多变量模型 (逐步多元线性回归 (SMLR) 模型和偏最小二乘回归 (PLSR) 模型), 并利用交叉验证决定系数 (R_{cv}^2) 和均方根误差 ($RMSE_{cv}$) 进行模型精度检验。结果表明, 不同回归模型相比, 多变量回归模型精度较高; 多变量回归模型中, PLSR 模型精度较高, R_{cv}^2 可达 0.72, $RMSE_{cv}$ 仅为 0.24, 是建立湿地植物光谱与水体总氮含量关系的最优模型。不同湿地植物类型相比, 利用芦苇反射光谱建立的各种预测模型的精度都高于香蒲。其他环境因子 (总磷) 也是影响 TN 含量与湿地植物反射光谱关系的重要因素。研究成果可以弥补现有水体富营养化遥感探测的不足, 并为再生水利用的城市湿地水质监测与管理提供有力的科学依据。

关键词: 湿地植物; 遥感; 反射光谱; 富营养化; 总氮; 再生水

Estimating total nitrogen content in water body based on reflectance from wetland vegetation

LIU Ke^{1,2,3,4}, ZHAO Wenji^{1,2,3,4}, GUO Xiaoyu^{1,2,3,4,*}, WANG Yihong⁵, SUN Yonghua^{1,2,3,4}, MIAO Qian^{1,2,3,4},
WANG Jingmeng^{1,2,3,4}

1 College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China

2 Urban Environmental Processes and Digital Modeling Laboratory, Beijing 100048, China

3 Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, MOST, Beijing 100048, China

4 Beijing Municipal Key Laboratory of Resources Environment and GIS, Beijing 100048, China

5 Beijing Institute of Geology, Beijing 100120, China

Abstract: Supplying urban wetlands with reclaimed water is recognized as a superior way for wetland restoration and reconstruction. However, the high concentration of nitrogen and phosphorus in reclaimed water can easily lead to water eutrophication. Although remote sensing technology has become a useful tool to monitor the eutrophication of water body, it

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40901281, 41101404); 国际科技合作项目 (2010DFA92400); 北京市教委科技计划面上项目 (KM201110028013); 国家基础测绘项目 (2011A2001)

收稿日期: 2011-03-08; 修订日期: 2011-11-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaoyucnu@126.com

is usually employed to detect eutrophication in open water. Limited applications have been found in measuring eutrophication of wetland covered by vegetation. Utilizing plants spectral response to environment can monitor environmental changes. This study explores the possibility to use wetland vegetation reflectance spectra in estimating total nitrogen content which is one of the key indicators of water eutrophication. The South Wetland in the Olympic Park in Beijing, a typical wetland using reused water, was selected as our study area. The leaf reflectance spectra of main wetland plants, reed (*Phragmites australis*) and cattail (*Typha angustifolia*), were acquired by means of an ASD FieldSpec 3 spectrometer (350—2500nm). Water quality samples were collected at the same time and analyzed by Center for Environmental Quality Test, Tsinghua University subsequently. The research established several univariate models including simple ratio spectral index (SR) model and normalized difference spectral index (ND) model, as well as multivariate models including stepwise multiple linear regression (SMLR) model and partial least squares regression (PLSR) model. The accuracy of these models was tested through cross-validated coefficient of determination (R_{cv}^2) and cross-validated root mean square error ($RMSE_{cv}$). The results have shown that 1) In comparison with univariate techniques, multivariate regressions can improve the estimation of total nitrogen concentration in water. The accuracy of PLSR model was the highest ($R_{cv}^2 = 0.72$, $RMSE_{cv} = 0.24$) among all models. PLSR provides the most useful explorative tool for unraveling the relationship between spectral reflectance of wetland plants and total nitrogen content in water at leaf scale. 2) The accuracy of prediction models built in this study using *Phragmites australis* reflectance spectra is higher than those using *Typha angustifolia* reflectance spectra. 3) Other environmental factors should also be discreetly considered in modeling exercise. Total phosphorus is found to have impact on the relationship between TN and reflectance spectra from wetland vegetation. Strong predictive power for multiple regression equations has been achieved when the range of total phosphorus was restricted. The result from this study can not only fill the gaps in the detection of eutrophication using remote sensing, but also provide a strong scientific basis for the water quality monitoring and management of urban wetlands using recycled water.

Key Words: wetland vegetation; remote sensing; reflectance; eutrophication; total nitrogen; reclaimed water

水资源匮乏是导致我国湿地丧失和湿地功能退化的主要原因。目前,再生水作为一种稳定的水源,在缓解城市水资源供需矛盾、恢复湿地功能等方面发挥了重要作用,但是再生水中丰富的氮、磷含量使得水体存在较高的富营养化风险。水体富营养化监测是富营养化水体治理与修复的基本前提。目前,遥感以其监测范围广、速度快、成本低等优势成为水体富营养化监测的重要手段。许多学者利用多光谱遥感影像获取氮、磷、叶绿素 a 浓度等水质参数进行水体富营养化监测与评价研究,并取得了较好的结果^[1-2]。然而,传统多光谱传感器的光谱分辨率较低,难以辨别水质参数的诊断性吸收特征,而高光谱遥感器具有很窄的电磁波波段,可以从目标物获取更多有用的信息,因此广泛应用于水体富营养化监测^[3-4]。同时,一些学者也利用地面实测光谱,通过研究水质参数与水体反射光谱特征之间的关系,建立水质参数反演算法,进行水体富营养化研究,对高光谱遥感影像的水体富营养化监测起到了促进和指导作用^[5-6]。但是这些研究大多针对开阔水体,而针对水面覆盖湿地植物的水体富营养化探测研究尚不多见。研究利用湿地植物光谱监测水体富营养化具有重要意义。国外已有学者开始探索利用湿地植物光谱监测湿地环境变化。Hardisky 等通过对盐沼湿地分别灌溉污水和淡水来研究互花米草对高氮和低盐环境的生理响应及光谱响应,结果表明利用湿地植物光谱可以有效探测环境胁迫^[7]; Tilley 等测定了不同湿地植物类型的反射光谱,分析了水体盐度对湿地植物光谱的影响,并考察了各光谱指数对盐度的敏感性,成功监测了海水入侵对淡水湿地的影响^[8]。而目前国内对湿地植物光谱的研究主要集中在分类制图和生理生化参数的反演方面,利用其监测环境变化的研究较少。

湿地植物可以有效吸收水中的营养物质,因而植物组织氮磷含量与水中氮磷浓度存在一定的关系^[9]。前人研究发现,通过植物光谱可以准确获得植物氮素状况^[10],因此湿地植物光谱反射特性能够间接反映水体氮浓度高低。本研究以富营养化主控因子总氮为研究对象,系统测定湿地植物叶片反射光谱及水质参数,并

对二者的关系进行分析,探讨利用湿地植物光谱监测水体富营养化的可行性,以期为全面进行水体富营养化遥感监测提供科学依据,为再生水利用的城市湿地恢复与管理提供参考、借鉴。

1 研究区概况

奥林匹克公园南园湿地地处北京市区北部,位于奥林匹克公园内(图1)。该区属暖温带半干旱半湿润大陆性季风气候。多年平均气温11—12℃,极端最高气温41.6℃,极端最低气温-21.2℃。多年平均水面蒸发量在1200mm左右,多年平均降雨量约600mm^[11]。降雨年内分配不均,多集中在汛期6—9月,约占全年的85%。奥林匹克公园以清河、北小河再生水处理厂的出水为补水水源,并循环利用,且补水入湖前流经南园湿地以改善水质。南园湿地以再生水处理湿地和循环水处理湿地为核心,植物氧化塘、生态氧化塘为辅助,混合生态功能区为补充,形成多层次的湿地净化系统^[11](图1)。该净化系统的各个部分均布有大量水生植物,主要包括芦苇、香蒲、水葱、千屈菜等,集中分布在再生水处理湿地和循环水处理湿地,在其他子区分布于距离岸边0—10m处。植被覆盖度较高,可达70%—90%。通过植物的净化作用出水水质可以达到地表Ⅲ类水水质标准(GB3838—2002)。

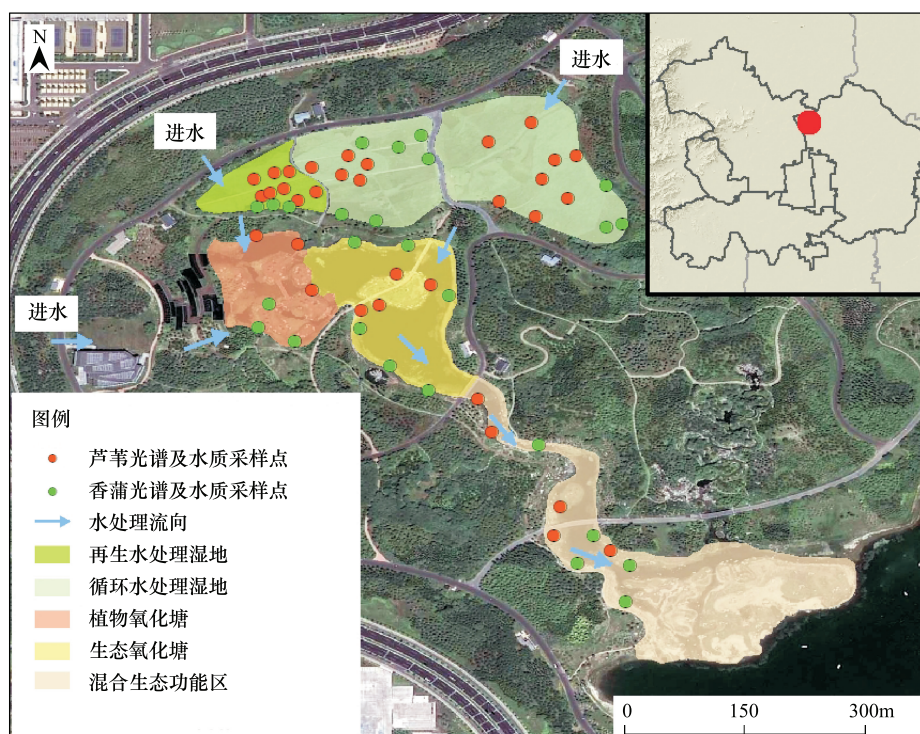


图1 奥林匹克公园南园湿地地理位置、净化系统布置及采样点分布图

Fig. 1 Location, distribution of the purification system and sampling sites in the South Wetland

2 研究方法

2.1 湿地植物光谱与水质数据采集

选择研究区主要的湿地植物芦苇和香蒲为光谱采集对象。根据两种湿地植物在每个水质净化子系统(再生水处理湿地,循环水处理湿地,植物氧化塘,生态氧化塘,混合生态功能区)的分布情况,设置芦苇光谱采样点33个,香蒲光谱采样点26个,采样点空间位置见图1。于2010年8月进行湿地植物叶片光谱测量,测量仪器采用美国ASD (Analytical Spectral Device)公司FieldSpec® 3便携式地物波谱仪。该仪器探头视场角度为10°,光谱范围为350—2500 nm,光谱分辨率在700 nm时为3 nm,在1400 nm时为8.5 nm,在2100 nm时为6.5 nm,光谱采样间隔在350—1000 nm为1.4 nm,在1000—2500 nm为2 nm。野外测量选择晴朗无风的天气,测量时间为10:00—14:00,根据天气条件进行优化,至多每20 min利用白板进行1次。测量时选择植株从顶部下数第一片完全展开的新叶,探头距离叶片中间部位约5 cm,保证探头的视野范围落在叶片上,同

时注意避开叶脉位置,每个样点一次保存 10 条光谱。

测量植物光谱的同时采集距水面 0.1 m 左右的表层水作为水质样品。检测指标包括总氮(TN)、总磷(TP)。检测方法分别为碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB/T11894—1989),钼酸铵分光光度法(GB11893—1989)。各指标含量的统计结果见表 1。

表 1 奥林匹克公园南园湿地 2010 年 8 月水质状况统计表
Table 1 Water quality of the South Wetland in August 2010

| 水质参数 (mg/L) Constituent | 最小值 Min | 最大值 Max | 均值 Mean | 标准差 Standard deviation | 极差 Range |
|----------------------------|------------|------------|------------|---------------------------|-------------|
| TN | 0.05 | 2.51 | 0.81 | 0.55 | 2.46 |
| TP | 0 | 0.29 | 0.07 | 0.05 | 0.29 |

2.2 数据处理

2.2.1 光谱数据预处理

对每个样点采集的光谱进行平均,去掉水汽吸收带和噪声较大的波段(350—400 nm,1340—1450 nm,1780—2000 nm,2350—2500 nm)。为减少数据冗余度,对光谱进行重采样(仪器输出光谱自动重采样为 1 nm 的分辨率),采样间隔为 5 nm,并采用 Savitzky-Golay 方法进行平滑,该方法为窗口移动多项式最小二乘平滑,能够保留光谱细微特征并减少随机噪声,提高光谱信噪比^[12]。

2.2.2 高光谱指数计算

通过构造光谱指数,可以使植被反射信息最大化、外部因素影响最小化^[13]。本研究构造了 400—2350 nm 波段范围内(去除波段除外)由任意两个波段反射率组合而成的所有比值(1)、归一化差值(2),分析它们与水体 TN 浓度的关系。

$$SR = \frac{\rho_{\lambda 1}}{\rho_{\lambda 2}} \quad (1)$$

$$ND = \frac{\rho_{\lambda 1} - \rho_{\lambda 2}}{\rho_{\lambda 1} + \rho_{\lambda 2}} \quad (2)$$

式中, SR 为比值光谱指数, ND 为归一化光谱指数, $\rho_{\lambda 1}$ 为波段 $\lambda 1$ 的反射率, $\rho_{\lambda 2}$ 为波段 $\lambda 2$ 的反射率, $\lambda 1 \neq \lambda 2$ 。

2.2.3 模型建立及精度验证

采样 3 种方式构建模型。(1)利用线性回归分别建立两类光谱指数与水体 TN 含量的回归模型。(2)利用逐步多元线性回归(SMLR)构建预处理后光谱与水体 TN 含量的回归模型。(3)利用偏最小二乘回归(PLSR)构建预处理后光谱与水体 TN 含量的回归模型^[14]。模型精度检验采用舍一交叉验证方法(Leave-One-Out, LOO)^[15],评价指标为交叉验证决定系数(R_{cv}^2)和交叉验证均方根误差(RMSE_{cv}),并绘制实测值与估计值之间的 1:1 关系图。

3 结果与分析

3.1 湿地植物光谱特征

分别对芦苇和香蒲所有样点的光谱反射率数据进行平均计算,以再生水处理区(净化始端)和混合生态功能区(净化末端)为例,对比不同处理区的植物反射光谱(图 2)。再生水处理区芦苇和香蒲在可见光波段反射率都比混合功能区低约 10%—20%,在近红外波段则相反,高出约 10%—30%,可见光区的光谱特征受各种色素的共同影响,色素含量高则吸收强,反射率就低;近红外区域的光谱特征主要受叶肉结构的影响。这种变化为研究植物光谱与水体 TN 含量的关系奠定了基础。

3.2 模型及精度评价

3.2.1 光谱指数模型

分别计算芦苇和香蒲两波段光谱反射率组成的比值和归一化光谱指数与水体 TN 含量的决定系数,结果

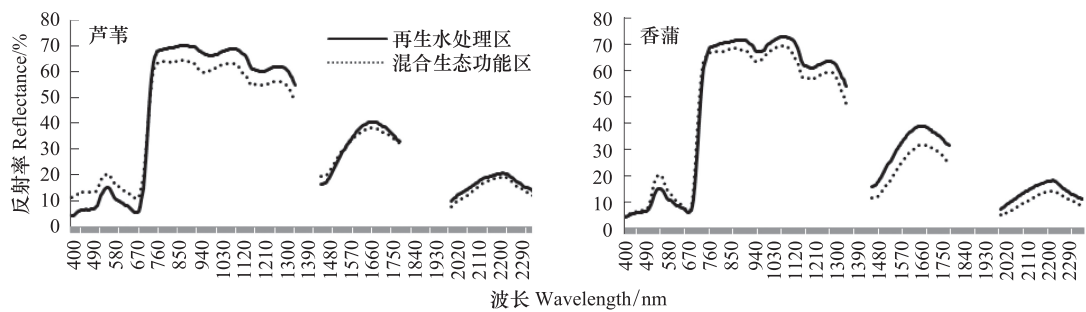


图2 再生水处理区与混合生态功能区芦苇和香蒲的光谱反射率

Fig. 2 Reflectance of *Phragmites australis* and *Typha angustifolia* in reclaimed water treatment area and mixed ecological function area

显示比值指数优于归一化指数,而且相关系数高的比值组合其归一化组合表现也较好,即归一化组合和比值组合之间具有一定的相似性(图3)。虽然相关性达到 $P<0.01$ 显著水平,但是总体相关性并不高,尤其是香蒲反射光谱构建的高光谱指数。对于不同的湿地植物类型,相关性较好的波段组合有所差异。芦苇较好的组合波段为575—720 nm与400—505 nm组合,香蒲较好的组合波段为680—700 nm与445—670 nm组合。尽管不同植物的最佳光谱指数并不完全吻合,但是存在比较稳定的波段组合,如680—700 nm的红光波段与445—505 nm的蓝绿波段组合。

利用芦苇反射光谱构成的两种形式参数中,与水体TN含量相关性最好的指数分别是SR(690,495),ND(690,495);利用香蒲反射光谱构成的两种形式指数中,与水体TN含量相关性最好的指数分别是SR(690,505),ND(690,505)。利用最优的光谱指数与水体TN含量建立线性回归模型,并对模型进行交叉验证,交叉验证的决定系数和均方根误差如表2所示。本研究构建的不同植物类型的数学模型中,利用芦苇反射光谱构建的SR模型和ND模型的 R^2_{cv} 分别为0.61和0.59, $RMSE_{cv}$ 分别为0.27和0.28;而利用香蒲反射光谱构建的SR模型和ND模型的 R^2_{cv} 均为0.43, $RMSE_{cv}$ 均为0.39。图4直观显示了模型的预测能力。利用香蒲光谱建立的预测水体氮含量的估计值和实测值的 R^2_{cv} 较小,均小于0.5。利用芦苇光谱建立预测模型的估计值和实测值的 R^2_{cv} 达0.5以上,尤其是SR模型, R^2_{cv} 达到了0.61,说明模型的预测准确性较好。

磷的盈亏同样影响植物光谱反射率^[16-17]。据此,本文进一步研究在一定的总磷浓度范围内构建模型,通过调整的决定系数评价模型对TN波动的解释能力,希望进一步改善TN含量的估算效果。利用芦苇的SR,选择总磷浓度大于0.06 mg/L样本(样本数为13)建立的模型对TN的解释程度为79% ($P<0.01$),而利用所有样本建立的模型对TN的解释程度仅60%;同等总磷浓度条件下,利用香蒲的SR所建模型(样本数为8)对TN的解释程度为48% ($P<0.01$),而利用所有样本建模对TN的解释程度仅41%。

表2 模型的最佳构建波段及交叉验证结果

| Table 2 Band position and performance of models for predicting TN concentration | | | | |
|---|---------------------|----------------------------|------------|-------------|
| 湿地植物类型 Species | 模型类型 Model types | 入选波段/nm Selected bands | R^2_{cv} | $RMSE_{cv}$ |
| 芦苇 <i>Phragmites australis</i> | SR 模型 | 690/495 | 0.61 | 0.27 |
| | ND 模型 | 690/495 | 0.59 | 0.28 |
| | SMLR 模型 | 420,685,950,1190,1450,1555 | 0.66 | 0.25 |
| | PLSR 模型 | — | 0.72 | 0.24 |
| 香蒲 <i>Typha angustifolia</i> | SR 模型 | 690/505 | 0.43 | 0.39 |
| | ND 模型 | 690/505 | 0.43 | 0.39 |
| | SMLR 模型 | 455,685,730,1125 | 0.47 | 0.38 |
| | PLSR 模型 | — | 0.48 | 0.37 |

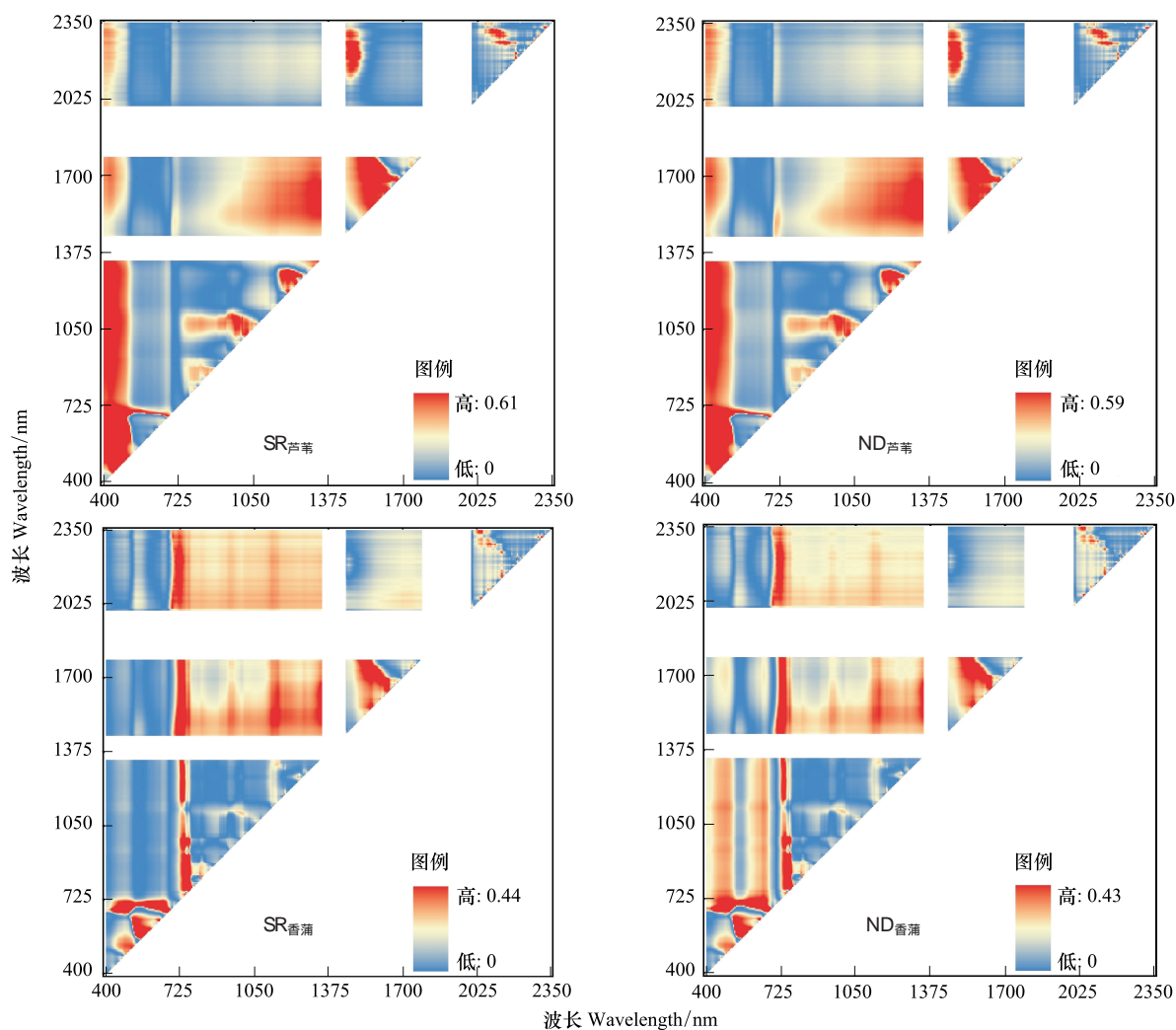


图3 光谱指数与水体 TN 含量的决定系数图

Fig.3 2-D correlation plots illustrating the coefficient of determination between spectral indices and TN content in water

3.2.2 SMLR 模型

针对不同的湿地植物类型,利用预处理后的反射光谱,通过逐步回归方法从所有的波段中选择进入模型的波段。由于较多的波段数量使得不同波段反射参量之间容易出现“多重共线性”,因此利用方差膨胀因子作为共线性诊断指标^[18]。方差膨胀因子值大于 10 时,可以认为因子间存在较严重的多元共线性。经计算,两个模型各自变量的方差膨胀因子均小于 10,不存在多元共线性。

利用入选波段建立水体 TN 含量与不同湿地植物光谱的线性模型。相对于两波段光谱指数模型,逐步多元线性回归模型的 R_{cv}^2 增大, $RMSE_{cv}$ 减小,精度有所提高(表 2)。交叉验证实测值和估计值 1:1 关系图(图 5)直观的表明不同湿地植物类型相比,芦苇所建立的模型精度较高。

3.2.3 PLSR 模型

首先对水体 TN 浓度和预处理后的光谱反射率进行均值中心化处理,然后应用偏最小二乘法建立水体 TN 含量和不同湿地植物反射光谱之间的关系。根据交叉有效性的原理^[14],得到芦苇和香蒲所提取的成分维数为均为 6。利用芦苇和香蒲反射光谱建立的偏最小二乘法回归模型相对于两波段光谱指数模型,其 R_{cv}^2 分别增加了 0.11 和 0.05, $RMSE_{cv}$ 分别减少了 0.03 和 0.02;相对于逐步回归模型,其 R_{cv}^2 分别增加了 0.06 和 0.01, $RMSE_{cv}$ 分别减少了 0.01 和 0.01,精度有所提高(表 2)。交叉验证实测值和估计值 1:1 关系图(图 6)直观反映了不同湿地植物类型相比,仍然是芦苇所建立的模型精度较高。

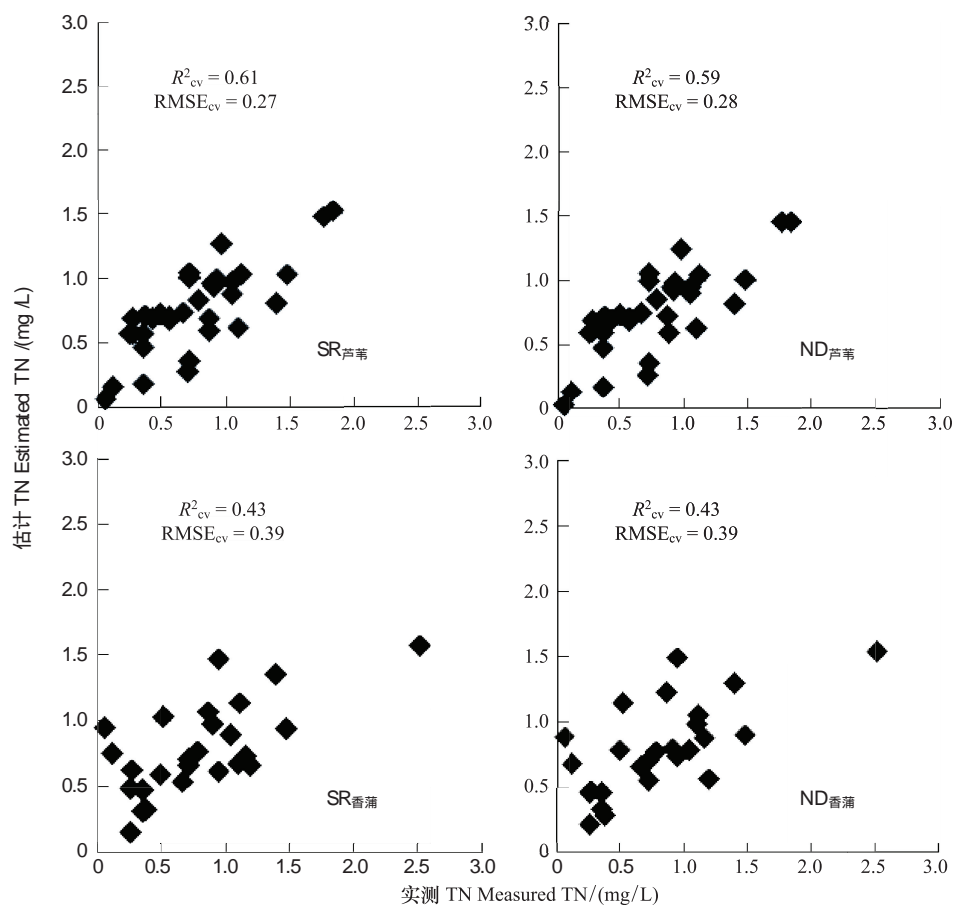


图 4 光谱指数模型的交叉验证实测值和估计值的 1:1 关系图

Fig. 4 The 1:1 relationship between the estimated value and measured value in cross validation of spectral indices model

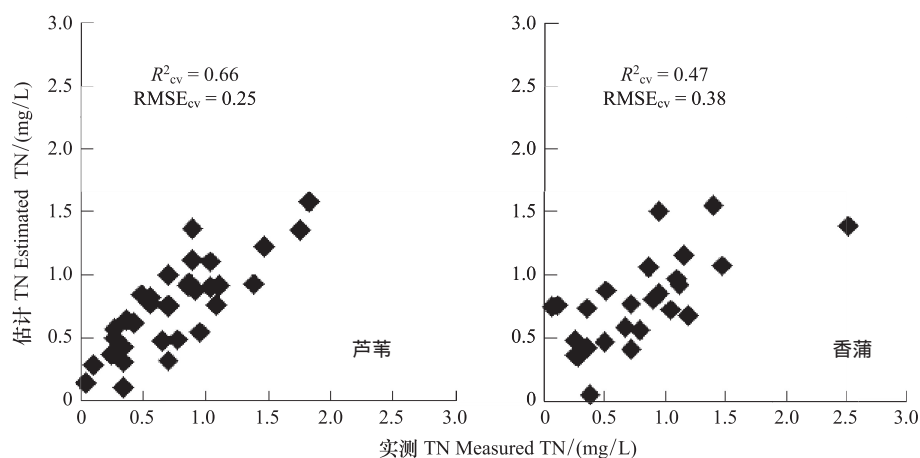


图 5 逐步多元线性回归模型的交叉验证实测值和估计值 1:1 关系图

Fig. 5 The 1:1 relationship between the estimated value and measured value in cross validation of SMLR model

4 结论与讨论

植物光谱除了直接反映植物生长状态外,还可以间接反映其立地环境。许多研究表明通过植物对环境的光谱响应可以探测环境因子的变化,如土壤含氮量、含盐量和矿产资源等^[19-21]。除了在农作物、矿产有所应用以外,本研究表明利用湿地植物光谱探测水体 TN 含量亦具有现实可行性。相比复杂的室内实验获取水质

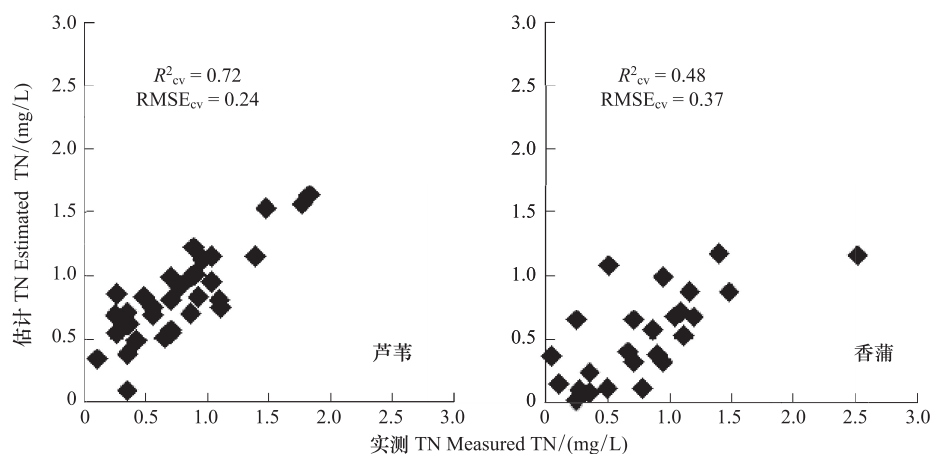


图6 偏最小二乘回归预测水体 TN 含量交叉验证实测值和估计值 1:1 关系图

Fig. 6 The 1:1 relationship between the estimated value and measured value in cross validation of PLSR model

参数,利用湿地植物光谱通过简单的波段计算即可得到水体 TN 含量,该方法不仅适时快捷,而且可以弥补遥感限于开阔水域富营养化探测的不足,为更加全面的获取整个水域的富营养化信息提供技术手段和方法,因而在富营养化监测与管理方面具有较大的应用潜力。

本研究利用 3 种方法建立了湿地植物反射光谱与水体 TN 含量的模型。对模型进行综合比较发现:(1)从模型精度来看,SMLR 和 PLSR 方程的精度要高于两波段光谱指数回归方程。由于两波段光谱指数模型仅应用到了两个波段,未充分利用高光谱数据丰富的光谱信息,容易造成重要信息的丢失^[22]。而其他两种模型都具有较多的光谱参量,精度也都有不同程度的提高,其中 PLSR 更是考虑了全谱区各波长点的光谱参数,并解决了多元线性回归中变量多、重相关性等问题,因而精度最高。很多研究利用该方法进行光谱分析,在土壤元素含量以及农作物、牧草生理参数估算等方面获得了较好的结果^[23-25]。本研究也证明利用该方法能够得到更精确的水体 TN 含量预测模型。(2)从入选波段来看,两波段光谱指数模型的入选波段分布于可见光波段的蓝、绿光波段和红光波段。同样,SMLR 模型的入选波段也包含蓝光波段和红光波段,而这些波段正是叶绿素的强烈吸收或反射波段^[26]。说明水体 TN 含量对湿地植物叶绿素含量有重要影响。前人研究表明,植物叶片中叶绿素的含量与氮供给量密切相关^[27],进而影响叶片的光谱反射率^[28]。基于这一点,很多研究利用植物光谱诊断施氮量,并取得了较好的效果^[29-30]。经总结发现,这些相关研究所利用的光谱波段与本研究具有一定的相似性,说明一些关键波段在植被研究中具有普遍适用性^[31];而差别则说明不同植物类型对营养物质的光谱响应存在差异。(3)从湿地植物类型看,模型精度在不同湿地植物类型之间存在差异,利用芦苇光谱的模型精度均高于香蒲。有文献表明芦苇对氮的吸收能力高于香蒲^[32-33],说明芦苇更能反映所处的环境特征,这可能是其回归模型精度较高的原因。另外,芦苇和香蒲均为广布世界的水生种,能够在富营养化水体中生存,并广泛应用于人工湿地的水质净化。研究正是通过这两种湿地植物光谱来探测水体富营养化信息,具有一定的现实意义,且对于监测湿地水质净化效果也具有潜在的应用价值。

植物光谱是多种生态环境因子的综合反映^[34]。研究发现水体总磷含量在一定程度上影响 TN 含量与湿地植物反射光谱间的关系。在高磷环境中利用多元回归方法预测 TN 含量能够更加准确,而再生水本身通常含磷量较高,因此所建模型更适合再生水水环境的 TN 估测。

由于研究区 TN 浓度仅代表轻、中富营养化,因此本研究仅表明利用湿地植物光谱估算低、中浓度的水体 TN 是可行的。考虑到重度富营养化环境可能引起湿地植物氮吸收饱和,在一定程度上影响湿地植物光谱对水体 TN 的响应特征,本研究的方法和模型针对重度富营养化水体环境的适用性有待今后进一步研究。

本研究利用不同湿地植物类型光谱,应用多种统计回归方法预测水体 TN 含量,建立了 3 种模型,包括光谱指数模型,SMLR 模型和 PLSR 模型。并通过交叉验证决定系数和均方根误差对模型精度进行检验。结果

表明,同单变量回归模型相比,多变量回归模型的精度较高,其中偏最小二乘法是建立湿地植物光谱与水体富营养化关系的最优模型。模型建立时不仅要考虑建模方法,还要兼顾植物类型和其他环境因子的综合影响。研究成果可以为全面进行水体富营养化的大面积遥感监测提供有力的科学依据,为再生水利用的城市湿地管理与保护提供一定的参考、借鉴。

致谢:澳大利亚联邦科学与工业研究组织水土资源研究所陈芸教授对本文写作给予帮助。王志恒、林川、张翼然、段光耀、阿多、杨典华、袁德阳、尹川、朱先芳、熊薇参与了大量野外采样和室内化验分析工作,特此致谢。

References:

- [1] Torbick N, Hu F, Zhang J Y, Qi J G, Zhang H J, Becker B. Mapping Chlorophyll — a concentrations in West Lake, China using Landsat 7 ETM+. *Journal of Great Lakes Research*, 2008, 34(3): 559-565.
- [2] Qiao P L, Zhang J X, Lin Z J. The application of remote sensing technique to monitoring and evaluating water pollution in the Shiyang river valley. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2003, (4): 39-45.
- [3] Hakvoort H, de Haan J, Jordans R, Vos R, Peters S, Rijkeboer M. Towards airborne remote sensing of water quality in the Netherlands-validation and error analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2002, 57(3): 171-183.
- [4] Matthews M W, Bernard S, Winter K. Remote sensing of cyanobacteria-dominant algal blooms and water quality parameters in Zeekoevlei, a small hypertrophic lake, using MERIS. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(9): 2070-2087.
- [5] Le C F, Li Y M, Zha Y, Sun D Y, Huang C C, Lu H. A four-band semi-analytical model for estimating chlorophyll a in highly turbid lakes: the case of Taihu Lake, China. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(6): 1175-1182.
- [6] Du W J, Li S M, Li H, Sun D F, Zhou L D. Spectral characteristics analysis and remote sensing inversion of water quality parameters in *Han Shiqiao* wetland. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(3): 757-761.
- [7] Hardisky M A, Smart R M, Klemas V. Growth response and spectral characteristics of a short *Spartina alterniflora* salt marsh irrigated with freshwater and sewage effluent. *Remote Sensing of Environment*, 1983, 13(1): 57-67.
- [8] Tilley D R, Ahmed M, Son J H, Badrinarayanan H. Hyperspectral reflectance response of freshwater macrophytes to salinity in a brackish subtropical marsh. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(3): 780-789.
- [9] Wu A P, Wu S K, Ni L Y. Study of macrophytes nitrogen and phosphorus contents of the shallow lakes in the middle reaches of Changjiang River. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2005, 29(4): 406-412.
- [10] Zhou D D, Tian Y C, Yao X, Zhu Y, Cao W X. Quantitative relationships between leaf total nitrogen concentration and canopy reflectance spectra of rice. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 337-344.
- [11] Deng Z Z. On Water System and Rainwater Harvesting System in Beijing Olympic Green. Beijing: China Water Power Press, 2009: 54-88.
- [12] Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 1964, 36(8): 1627-1638.
- [13] Yang J, Tian Y C, Yao X, Cao W X, Zhang Y S, Zhu Y. Hyperspectral estimation model for chlorophyll concentrations in top leaves of rice. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6561-6571.
- [14] Wang H W. Partial Least Squares Regression and Its Applications. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 178-234.
- [15] Efron B, Gong G. A leisurely look at the bootstrap, the jackknife, and cross-validation. *The American Statistician*, 1983, 37(1): 36-48.
- [16] Osborne S L, Schepers J S, Francis D D, Schlemmer M R. Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements. *Agronomy Journal*, 2002, 94(6): 1215-1221.
- [17] Ren H Y, Zhuang D F, Pan J J, Qiu D S, Zhang J B. Effect of phosphorus stress on winter wheat canopy spectral reflectance. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(6): 1326-1330.
- [18] Yoder B J, Pettigrew-Crosby R E. Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400—2500 nm) at leaf and canopy scales. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 53(3): 199-211.
- [19] Liu F J, Wu X C, Guo Y, Sun H S, Mei L L. Vegetation anomalies of the Zhaoyuan gold deposits, Shandong Province and its significance in remote sensing exploration. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2007, 37(3): 444-449.
- [20] Strachan I B, Pattey E, Boisvert J B. Impact of nitrogen and environmental conditions on corn as detected by hyperspectral reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(2): 213-224.
- [21] Wang D, Wilson C, Shannon M C. Interpretation of salinity and irrigation effects on soybean canopy reflectance in visible and near-infrared spectrum domain. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(5): 811-824.

- [22] Lee K S, Cohen W B, Kennedy R E, Maierberger T K, Gower S T. Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3/4): 508-520.
- [23] Shen Z Q, Wang K, Huang X W. Estimating the content of soil carbon by using near-infrared spectra. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(1): 31-37.
- [24] Zhang Y S, Yao X, Tian Y C, Cao W X, Zhu Y. Estimating leaf nitrogen content with near infrared reflectance spectroscopy in rice. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(6): 704-712.
- [25] Kawamura K, Watanabe N, Sakanoue S, Inoue Y. Estimating forage biomass and quality in a mixed sown pasture based on partial least squares regression with waveband selection. *Grassland Science*, 2008, 54(3): 131-145.
- [26] Hansen P M, Schjoerring J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4): 542-553.
- [27] Miao Y X, Mulla D J, Randall G W, Vetsch J A, Vintila R. Combining chlorophyll meter readings and high spatial resolution remote sensing images for in-season site-specific nitrogen management of corn. *Precision Agriculture*, 2009, 10(1): 45-62.
- [28] Chen P F, Haboudane D, Tremblay N, Wang J H, Vigneault P, Li B G. New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(9): 1987-1997.
- [29] Pan W C, Li S K, Wang K R, Xiao H, Chen B, Wang F Y, Su Y, Chen J L, Lai J C, Huang F D. Monitoring soil nitrogen and plant nitrogen based on hyperspectral of cotton canopy. *Cotton Science*, 2010, 22(1): 70-76.
- [30] Xue L H, Lu P, Yang L Z, Shan Y H, Fan X H, Han Y. Estimation of soil nitrogen status with canopy reflectance spectra in rice. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(4): 675-681.
- [31] Cochrane M A. Using vegetation reflectance variability for species level classification of hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(10): 2075-2087.
- [32] Chen Y H, Wu X F, Jiang L J, Chen M L, Zeng M, Lei D, Zhang Z N, Yang S Y. Screening and evaluation of plant purification potential for phytoremediation of sanitary sewage. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(8): 1549-1554.
- [33] Gersberg R M, Elkins B V, Lyon S R, Goldman C R. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands. *Water Research*, 1986, 20(3): 363-368.
- [34] Yue Y M, Wang K L, Zhang B, Chen Z C, Jiao Q J, Liu B, Chen H S. Exploring the relationship between vegetation spectra and eco-geo-environmental conditions in karst region, Southwest China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 160(1/4): 157-168.

参考文献:

- [2] 乔平林, 张继贤, 林宗坚. 石羊河流域水质环境遥感监测评价研究. *国土资源遥感*, 2003, (4): 39-45.
- [6] 杜为静, 李淑敏, 李红, 孙丹峰, 周连第. 汉石桥湿地水质参数光谱分析与遥感反演. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(3): 757-761.
- [9] 吴爱平, 吴世凯, 倪乐意. 长江中游浅水湖泊水生植物氮磷含量与水柱营养的关系. *水生生物学报*, 2005, 29(4): 406-412.
- [10] 周冬琴, 田永超, 姚霞, 朱艳, 曹卫星. 水稻叶片全氮浓度与冠层反射光谱的定量关系. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 337-344.
- [11] 邓卓智. 北京奥林匹克公园水系及雨洪利用系统研究、设计与示范. 北京市水利规划设计研究院. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 54-88.
- [13] 杨杰, 田永超, 姚霞, 曹卫星, 张玉森, 朱艳. 水稻上部叶片叶绿素含量的高光谱估算模型. *生态学报*, 2009, 29(12): 6561-6571.
- [14] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用. 北京: 国防工业出版社, 2000: 178-234.
- [17] 任红艳, 庄大方, 潘剑君, 邱冬生, 张佳宝. 磷营养胁迫对冬小麦冠层光谱的影响. *土壤通报*, 2008, 39(6): 1326-1330.
- [19] 刘福江, 吴信才, 郭艳, 孙华山, 梅林露. 招远金矿区植被异常及遥感找矿意义. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2007, 37(3): 444-449.
- [23] 沈掌泉, 王珂, Huang X W. 用近红外光谱预测土壤碳含量的研究. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(1): 31-37.
- [24] 张玉森, 姚霞, 田永超, 曹卫星, 朱艳. 应用近红外光谱预测水稻叶片氮含量. *植物生态学报*, 2010, 34(6): 704-712.
- [29] 潘文超, 李少昆, 王克如, 肖华, 陈兵, 王方永, 苏毅, 陈江鲁, 赖军臣, 黄芳德. 基于棉花冠层光谱的土壤氮素监测研究. *棉花学报*, 2010, 22(1): 70-76.
- [30] 薛利红, 卢萍, 杨林章, 单玉华, 范晓晖, 韩勇. 利用水稻冠层光谱特征诊断土壤氮素营养状况. *植物生态学报*, 2006, 30(4): 675-681.
- [32] 陈永华, 吴晓芙, 蒋丽鹃, 陈明利, 曾敏, 雷电, 张珍妮, 阳石英. 处理生活污水湿地植物的筛选与净化潜力评价. *环境科学学报*, 2008, 28(8): 1549-1554.

CONTENTS

| | |
|---|--|
| Physiological responses of five deciduous broad-leaved tree seedlings in the Northeast Area of China to burning | WANG Rong, HU Haiqing (2303) |
| The occurrence regularity of psyllid in <i>Haloxylon</i> spp and its influencing factors | LI Fenlian, WU Xuehai, WANG Peiling, et al (2311) |
| The estimating of the spatial distribution of forest biomass in China based on remote sensing and downscaling techniques | LIU Shuangna, ZHOU Tao, SHU Yang, et al (2320) |
| Multivariate correlation analysis between landscape pattern and water quality | ZHAO Peng, XIA Beicheng, QIN Jianqiao, et al (2331) |
| Red fox habitat selection and landscape feature analysis in the Dalai Lake Natural Reserve in Inner Mongolia | ZHANG Honghai, LI Chengtao, DOU Huashan, et al (2342) |
| Research on assemblage characteristics of macroinvertebrates in the Yalu Tsangpo River Basin | XU Mengzhen, WANG Zhaoyin, PAN Baozhu, et al (2351) |
| Climate change induced potential range shift of the crested ibis based on ensemble models | ZHAI Tianqing, LI Xinhai (2361) |
| Analysis of the sources of second generation meadow moth populations that immigrated into Chinese pastoral areas in 2010 | ZHANG Li, ZHANG Yunhui, ZENG Juan, et al (2371) |
| Genetic diversity based on cytochrome <i>b</i> gene analysis of different geographic populations of blue sheep in China | LI Nannan, LIU Zhensheng, WANG Zhenghuan, et al (2381) |
| Soil microbial properties under different grain-for-green patterns in depressions between karst hills | LU Shiyang, PENG Wanxia, SONG Tongqing, et al (2390) |
| Ecosystem and soil respiration of a poplar plantation on a sandy floodplain in Northern China | FANG Xianrui, ZHANG Zhiqiang, ZHA Tonggang, et al (2400) |
| Estimating total nitrogen content in water body based on reflectance from wetland vegetation | LIU Ke, ZHAO Wenji, GUO Xiaoyu, et al (2410) |
| Analysis on complete F type of mitochondrial genome in <i>Lamprotula lei</i> | CHEN Ling, WANG Guiling, LI Jiale (2420) |
| The source-sink landscape pattern change and its effect on phosphorus pollution in Yuqiao watershed | LI Chongwei, HU Jie, WANG Sa, et al (2430) |
| Responses of soil nematode communities to soluble salt contamination around Gangue hill in Fushun | ZHANG Weidong, LV Ying, XIAO Ying, et al (2439) |
| Effect of aboveground competition on biomass partitioning of understory Korean pine (<i>Pinus koraiensis</i>) | WANG Jinsong, FAN Xiuhua, FAN Juan, et al (2447) |
| Research of methane metabolic microbial community in soils of slash pine plantation and Masson pine plantation | WANG Yun, ZHENG Hua, CHEN Falin, et al (2458) |
| $\delta^{13}\text{C}$ values of stem phloem water soluble sugars of <i>Pinus massoniana</i> and <i>Cunninghamia lanceolata</i> response to meteorological factors | LU Yuxi, WANG Zhenxing, ZHENG Huaizhou, et al (2466) |
| Soil respiration patterns during restoration of vegetation in the Shapotou area, Northern China | GAO Yanhong, LIU Lichao, JIA Rongliang, et al (2474) |
| Dynamics of caloric value of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. energy forest in the west of Henan Province | TAN Xiaohong, LIU Shiqi, MA Luyi, et al (2483) |
| <i>Ex-situ</i> symbiotic seed germination of <i>Dendrobium catenatum</i> | WU Huifeng, SONG Xiqiang, LIU Hongxia (2491) |
| Effects of red/far red ratio on morphological index, leaf area and dry matter partitioning of cut chrysanthemum flower | YANG Zaiqiang, ZHANG Jibo, LI Yongxiu, et al (2498) |
| Effect of prometryne on root activity and oxidative stress of <i>Polygala tenuifolia</i> Willd. seedling roots | WEN Yinyuan, GUO Pingyi, YIN Meiqiang, et al (2506) |
| Combined effects of elevated O_3 concentration and UV-B radiation on photosynthetic characteristics of soybean | ZHENG Youfei, XU Weimin, WU Rongjun, et al (2515) |
| Nutrients transfer for host plant and litter decomposition by AMF in Karst soil | HE Yuejun, ZHONG Zhangcheng, DONG Ming (2525) |
| The dynamics of bacteria community diversity during the fermentation process of traditional soybean paste | GE Jingping, CHAI Yangyang, CHEN Li, et al (2532) |
| Effect of site-specific fertilization on soil phosphorus in purple garden soil | SUN Qianqian, WANG Zhengyin, ZHAO Huan, et al (2539) |
| A method of determining standards for ecological compensation in agricultural areas, giving priority to environmental flows in water allocation | PANG Aiping, SUN Tao (2550) |
| The loss of ecosystem services value caused by food security assessment model and its application | LU Weiye, JIANG Zhide, ZHANG Yinglong, et al (2561) |
| Review and Monograph | |
| Review of the current situation of coastal ecological engineering using dredged marine sediments and prospects for potential application in China | HUANG Huamei, GAO Yang, WANG Yinxia, et al (2571) |
| Discussion | |
| Quorum sensing in anaerobic ammonium oxidation bacteria | DING Shuang, ZHENG Ping, ZHANG Meng, et al (2581) |
| Health evaluation of Dongting Lake based on morphological characters | SHUAI Hong, LI Jingbao, XIA Beicheng, et al (2588) |
| Scientific Note | |
| Effects of mix-leaf litter decomposition of different trees in the Loess Plateau | LIU Zengwen, DU Liangzhen, ZHANG Xiaoxi, et al (2596) |
| Changes in soil active organic carbon under different management types of bamboo stands | MA Shaojie, LI Zhengcai, WANG Bin, et al (2603) |
| Effects of drought stress on photosynthesis and associated physiological characters of pepper | OU Lijun, CHEN Bo, ZOU Xuexiao (2612) |
| Effects of silicon application and drought stress on photosynthetic traits and mineral nutrient absorption of rice leaves | CHEN Wei, CAI Kunzheng, CHEN Jining (2620) |

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 8 期 (2012 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 8 2012

| | | | |
|---------------|--|-----------------|---|
| 编 辑 | 《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by | Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn |
| 主 编 | 冯宗炜 | Editor-in-chief | FENG Zong-Wei |
| 主 管 | 中国科学技术协会 | Supervised by | China Association for Science and Technology |
| 主 办 | 中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 | Sponsored by | Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China |
| 出 版 | 科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717 | Published by | Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China |
| 印 刷 | 北京北林印刷厂 | Printed by | Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China |
| 发 行 | 科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net | Distributed by | Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net |
| 订 购 | 全国各地邮局 | Domestic | All Local Post Offices in China |
| 国外发行 | 中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044 | Foreign | China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China |
| 广告经营 许 可 证 | 京海工商广字第 8013 号 | | |



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元